



## Badania plastyczności stopu AlZn5,5MgCu dla warunków przeróbki plastycznej na gorąco

### *Investigation into the ductility of the AlZn5,5MgCu alloy for hot plastic working conditions*

(1) Anna Kułakowska<sup>1</sup>, (2) Konrad Laber\*<sup>2</sup>, (3) Henryk Dycja<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy im. Jana Długosza w Częstochowie, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Instytut Techniki i Systemów Bezpieczeństwa, Al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa, Poland

<sup>2</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Instytut Przeróbki Plastycznej i Inżynierii Bezpieczeństwa, Al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, Poland

#### Informacje o artykule

Zgłoszenie: 12.04.2018

Recenzja: 16.06.2018

Akceptacja: 28.09.2018

#### Wkład autorów

- (1) Koncepcja badań, założeń i metod badawczych, obróbka wyników badań dylatometrycznych, interpretacja wyników
- (2) Badania w próbach rozciągania i skręcania na gorąco, obróbka wyników
- (3) Nadzór merytoryczny, analiza wyników badań

#### Streszczenie

Najbardziej wiarygodnym sposobem wyznaczenia zdolności danego materiału do odkształcenia plastycznego bez naruszenia spójności jest określenie tzw. kryterium plastyczności. Kolejnym parametrem charakteryzującym podatność danego materiału do kształtowania plastycznego jest naprężenie uplastyczniające, zależne od odkształcenia, prędkości odkształcenia, temperatury oraz historii przebiegu odkształcenia. Istotny wpływ na plastyczność ma również stan mikrostruktury badanego materiału. W celu jego określenia w zależności od zmieniających się parametrów obróbki cieplno-plastycznej należy wykonać badania dylatometryczne, które umożliwiają wyznaczenie temperatury charakterystycznej badanego materiału oraz pozwalają na ujawnienie procesów zachodzących w jego strukturze podczas kolejnych etapów obróbki cieplno-plastycznej. Zakres przedstawionych w pracy badań obejmował określenie kryterium plastyczności stopu aluminium AlZn5,5MgCu w stanie T6 oraz po wyżarzaniu. Badania te przeprowadzono w statycznej próbie rozciągania w podwyższonej temperaturze, przy zastosowaniu maszyny wytrzymałościowej Zwick Z/100. W pracy wyznaczono również temperaturę rozpuszczania się i wydzielania w badanym materiale związków międzymetalicznych, z wykorzystaniem dylatometru DIL805A/D. Ponadto określono zmiany wartości naprężenia uplastyczniającego badanego materiału w zależności od parametrów odkształcenia oraz opracowano model matematyczny zmian własności reologicznych badanego stopu. Badania krzywych plastycznego płynięcia przeprowadzono w próbie skręcania z zastosowaniem plastometru skrętnego STD 812. Przeprowadzone w ramach pracy badania stanowiły podstawę doboru optymalnych parametrów procesu walcowania badanego stopu w trójwalcowej walcierce skośnej. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono istotny wpływ parametrów odkształcenia na wartość naprężenia uplastyczniającego badanego stopu aluminium. Stosując operację wyżarzania wsadu z badanego stopu aluminium AlZn5,5MgCu dostarczonego w stanie T6, można poprawić jego właściwości plastyczne, co umożliwi stosowanie większych odkształceń jednostkowych w procesie walcowania. Stwierdzono, że właściwą temperaturą walcowania analizowanego stopu w trójwalcowej walcierce skośnej będzie temperatura powyżej 200°C.

**Słowa kluczowe:** kryterium plastyczności, badania plastometryczne, odkształcalność graniczna, badania dylatometryczne, naprężenie uplastyczniające, stop aluminium serii 7XXX

\* Autor do korespondencji. Tel.: +48 34 325 06 62; e-mail: laber.konrad@wip.pcz.pl

\* Corresponding author. Tel.: +48 34 325 06 62; e-mail: laber.konrad@wip.pcz.pl

**Article info**

Received: 12.04.2018

Reviewed: 19.06.2018

Accepted: 28.09.2018

**Authors' contribution**

- (1) Concept of research, assumptions and research methodology, processing of dilatometric testing results, interpretation of results
- (2) Tensile and torsion testing, interpretation of results
- (3) Substantive supervision, interpretation of results

**Abstract**

The most reliable method of establishing the ability of a given material to deform plastically, while not losing its integrity, is by determining its so-called yield criterion. Another parameter that describes the susceptibility of a given material to being plastically formed is the yields stress, which is dependent on the strain, strain rate, temperature and the history of deformation. The ductility is also significantly influenced by the microstructural state of the material under examination. In order to determine it as dependent on the varying parameters of thermo-mechanical treatment, it is necessary to perform dilatometric tests to determine the characteristic temperatures of the examined material and to reveal processes occurring within its structure during successive thermo-mechanical treatment stages. The scope of the investigation covered in this study encompassed examinations to determine the yield criterion for the AlZn5.5MgCu aluminium alloy in condition T6 and after annealing. These examinations were carried out in static tensile tests at elevated temperature using a Zwick Z/100 testing machine. The temperatures of dissolution and precipitation of intermetallic compounds in the examined material were also determined using a DIL805A/D dilatometer. In addition, the variations in the magnitude of the yield stress of the examined material were determined as dependent on the deformation parameters, and a mathematical model of the rheological properties of the examined alloy was developed. The examination of the plastic flow curves was performed in a torsion test using an STD 812 torsion plastometer. The investigation carried out within the study provided a basis for the selection of the optimal parameters of the process of rolling the examined alloy on a three-high reeling mill. From the obtained results, a significant effect of the deformation parameters on the magnitude of the yield stress of the investigated aluminium alloy has been found. Using the operation of annealing the charge of the examined AlZn5.5MgCu aluminium alloy supplied in state T6, its plastic properties can be improved, which will enable larger unit deformation to be used in the rolling process. It has been found that the appropriate temperature of rolling the examined alloy on a three-high reeling mill will be a temperature above 200°C.

**Keywords:** yield criterion, plastometric testing, limiting deformability, dilatometric testing, yield stress, 7XXX series aluminium alloy

**1. WPROWADZENIE**

Termin stopnia wykorzystania zapasu plastyczności metalu  $\psi$  dla procesów przeróbki plastycznej po raz pierwszy wprowadził Kołmogorow. Według modelu Kołmogorowa wykorzystanie zapasu plastyczności w dowolnym momencie czasu  $t$  można wyznaczyć z wzoru [1, 2]:

$$\psi = \int_0^t \frac{Hd\tau}{\Lambda_p} \quad (1)$$

gdzie:  $H$  – intensywność prędkości odkształcenia przy ścinaniu,  $\tau$  – naprężenia styczne;  $\Lambda_p$  – odkształcenie ścinania do zniszczenia (plastyczność zakresowa): przy  $t = 0 - \psi = 0$ ; w chwili pęknięcia  $t_p - \psi = 1$ , a w dowolnej chwili czasu  $0 < t < t_p$  wartość  $\psi < 1$ .

Dla czasu  $t = t_p$  wartość plastycznego „osłabienia” osiąga wartość graniczną, a w materiale tworzy się mikroszczelina, osiągając wymiar krytyczny i następuje stadium zniszczenia [2]:

$$\psi = \int_0^{t_p} \frac{Hd\tau}{\Lambda_p} = 1 \quad (2)$$

**1. INTRODUCTION**

The term degree of utilization of metal plasticity reserve,  $\psi$ , for plastic working processes was first introduced by Kolmogorov. According to Kolmogorov's model, the utilization of plasticity reserve at an arbitrary point of time  $t$  can be determined from the formula [1, 2]:

$$\psi = \int_0^t \frac{Hd\tau}{\Lambda_p} \quad (1)$$

where:  $H$  – shear rate intensity at shearing,  $\tau$  – tangential stress;  $\Lambda_p$  – shear strain until a failure (shear-band plasticity): at  $t = 0 - \psi = 0$ ; at the moment of cracking  $t_p - \psi = 1$ , and at an arbitrary moment of time  $0 < t < t_p$ , a value of  $\psi < 1$ .

For a time of  $t = t_p$ , the value of plastic “weakening” attains a limiting level and a microcrack forms in the material, which then attains a critical size and a failure stage follows [2]:

$$\psi = \int_0^{t_p} \frac{Hd\tau}{\Lambda_p} = 1 \quad (2)$$

Z kolei wartość odkształcenia granicznego do chwili wystąpienia pęknięcia  $\Lambda_p$  określana jest przez termomechaniczne warunki odkształcenia [2]:

$$\Lambda_p = \Lambda_p(k_\sigma, \mu_\sigma, H, T, B(\tau), X_i) \quad (3)$$

gdzie:  $k_\sigma = \sigma_{si}/\tau_i$  – wskaźnik stanu naprężeń;  $\tau_i$  – intensywność naprężeń stycznych;  $\mu_\sigma$  – wskaźnik Lodego;  $B(\tau)$  – wskaźnik niemonotonności odkształcenia;  $H$  – intensywność prędkości odkształcenia przy ścinaniu;  $T$  – temperatura;  $X_i$  – fizyczno-chemiczne i strukturalne parametry odkształcanego materiału.

Warunek zniszczenia (2) daje dobre wyniki dla procesów, w których odkształcenie ma przebieg zbliżony do monotonicznego (przy  $B(\tau) = 1$ ) [2].

Podczas wielu procesów przeróbki plastycznej metali realizowanych w tym samym czasie występuje charakterystyczna niemonotoniczność odkształcenia. Największą niemonotoniczność obserwuje się podczas naprzemiennego (co do znaku) odkształcania, na przykład przy walcowaniu poprzecznym i kuciu z kantowaniem półwyrobu, przy dziurowaniu wsadu w walcarkach skośnych i podczas walcowania rur na zimno.

Zdolność do odkształcenia plastycznego bez naruszenia spójności (pęknięcia) jest ograniczona i dlatego plastyczność (odkształcalność) jest jedną z głównych cech materiału określających jego podatność do przeróbki plastycznej.

Najprostszym i najbardziej wiarygodnym sposobem wyznaczenia zdolności danego materiału do odkształcenia plastycznego bez naruszenia spójności jest kryterium plastyczności [2, 3]. Najbardziej rozpowszechnioną metodą badania plastyczności granicznej jest próba rozciągania. Jest ona metodycznie prosta i może być przeprowadzona za pomocą różnych maszyn badawczych. W badaniach standardowych na rozciąganie cechami plastyczności są wydłużenie względne  $A$ , przewężenie względne  $Z$  i odkształcenie rzeczywiste  $\varepsilon$ , obliczane z wzorów [3]:

$$A = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100\% \quad (3)$$

$$Z = \frac{S_0 - S_k}{S_0} 100\% \quad (4)$$

$$\varepsilon = \ln \left( \frac{S_0}{S_k} \right) \quad (5)$$

gdzie:  $l_0, l_k$  – początkowa i końcowa długość pomiarowa próbki,  $S_0, S_k$  – początkowa i końcowa powierzchnia przekroju poprzecznego próbki w miejscu zerwania (szyjce).

In turn, the value of limiting deformation until a moment of a crack occurring,  $\Lambda_p$ , is defined by the thermomechanical deformation conditions [2]:

$$\Lambda_p = \Lambda_p(k_\sigma, \mu_\sigma, H, T, B(\tau), X_i) \quad (3)$$

where:  $k_\sigma = \sigma_{si}/\tau_i$  – stress state index;  $\tau_i$  – tangential stress intensity;  $\mu_\sigma$  – Lode index;  $B(\tau)$  – strain nonmonotonicity index;  $H$  – strain rate intensity at shearing;  $T$  – temperature;  $X_i$  – physicochemical and structural parameters of the deformed material.

Failure condition (2) yields good results for processes, for which the strain has a variation similar to a monotonic one (at  $B(\tau) = 1$ ) [2].

During many processes of plastic working of metals carried out at the same time, a characteristic strain nonmonotonicity occurs. The greatest nonmonotonicity is observed during alternate deformation (in terms of its sign), for example in transverse milling and forging with blank rotation, and during cold tube rolling.

The ability to plastic deform without breaking the integrity (cracking) is limited, therefore ductility (deformability) is one of the major characteristics of material, defining its susceptibility to plastic working.

The simplest and most reliable method of establishing the ability of a given material to deform plastically, while not breaking its cohesion, is by determining its so-called yield criterion [2, 3]. The most widespread method of examining the limiting plasticity is the tensile test. It is methodologically simple and can be carried out using various testing machines. In standard tensile testing, the plasticity features are: unit elongation,  $A$ ; reduction of area,  $Z$ ; and true strain,  $\varepsilon$ ; all calculated from the formulae below [3], respectively:

$$A = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100\% \quad (3)$$

$$Z = \frac{S_0 - S_k}{S_0} 100\% \quad (4)$$

$$\varepsilon = \ln \left( \frac{S_0}{S_k} \right) \quad (5)$$

where:  $l_0, l_k$  – initial and end specimen gage length  $S_0, S_k$  – initial and end cross-sectional surface area of the specimen in the break location (neck).

Wszystkie wymienione wskaźniki można określać jedynie w obszarze odkształcenia równomiernego, a po pojawieniu się w badanej próbce szyjki wskaźnik  $A$  traci znaczenie fizyczne. Wykorzystanie natomiast wskaźnika  $Z$  jest mało poprawne ze względu na występowanie w szyjce zmiennego trójosiowego stanu odkształcenia i naprężenia, a także znacznie zwiększonej prędkości odkształcenia i temperatury.

Przy konstruowaniu wykresów plastyczności granicznej, według metodyki Kołmogorowa [2], w próbie rozciągania wyznacza się charakterystyczną wielkość  $\Lambda_p$  [2]:

$$\Lambda_p = 2\sqrt{3}\ln\left(\frac{d_0}{d_p}\right) \quad (6)$$

gdzie:  $d_0$ ,  $d_p$  – odpowiednio: początkowa średnica próbki i w miejscu zerwania.

Graniczna wartość odkształcenia może być wyrażona poprzez przewężenie  $Z$  [3–5]:

$$\Lambda_p = 1,73\ln[100/(100 - Z)] \quad (7)$$

W zakresie odkształcenia równomiernego podczas rozciągania próbek cylindrycznych wielkość  $\sigma_{sr}/\tau_i = 0,58$ , a wskaźnik naprężenia Lodego  $\mu_\sigma = -1$  [4].

## 2. CEL I ZAKRES PRACY

Celem przeprowadzonych w pracy badań było określenie kryterium plastyczności stopu aluminium AlZn5,5MgCu w stanie T6 (stan dostawy) oraz po wyżarzaniu (temperatura 460°C, czas 2 h, w atmosferze argonu, z następnym chłodzeniem z piecem). Badania te przeprowadzono w statycznej próbie rozciągania w podwyższonej temperaturze, przy zastosowaniu maszyny wytrzymałościowej Zwick Z/100.

Temperaturę rozpuszczania i wydzielenia się związków międzymetalicznych w badanym materiale wyznaczono podczas badań dylatometrycznych, z wykorzystaniem dylatometru DIL805A/D.

Zakres przeprowadzonych badań obejmował również określenie zmian wartości naprężenia uplastyczniającego badanego materiału w zależności od odkształcenia, prędkości odkształcenia i temperatury oraz aproksymację otrzymanych wyników badań eksperymentalnych i wyznaczenie współczynników równania aproksy-

*All of the aforementioned indices can only be determined in a uniform deformation region, and after a neck occurring in the test specimen, index  $A$  loses the physical meaning. By contrast, using index  $Z$  is little correct due to the existence of a variable three-dimensional strain and stress state in the neck, as well as a considerably increased strain rate and temperature.*

*When constructing limiting plasticity diagrams by Kolmogorov's methodology [2], the characteristic quantity  $\Lambda_p$  is determined in a tensile test [2]:*

$$\Lambda_p = 2\sqrt{3}\ln\left(\frac{d_0}{d_p}\right) \quad (6)$$

*where:  $d_0$ ,  $d_p$  – respectively, the initial specimen diameter and the specimen diameter at the breaking point.*

*The limiting deformation value can be expressed by the reduction of area  $Z$  [3–5]:*

$$\Lambda_p = 1,73\ln[100/(100 - Z)] \quad (7)$$

*In the uniform deformation range during the tension of cylindrical specimens, the quantity  $\sigma_{sr}/\tau_i = 0.58$ , and the Lode stress index,  $\mu_\sigma = -1$  [4].*

## 2. PURPOSE AND SCOPE OF THE STUDY

*The purpose of the investigation undertaken within the study to determine the yield criterion of aluminium alloy AlZn5.5MgCu in state T6 (as-delivered) and after annealing (at a temperature of 460°C and for a duration of 2 hrs, in an argon atmosphere with subsequent cooling with the furnace). This investigation was carried out in a static tensile test at elevated temperature using a Zwick Z/100 testing machine.*

*The temperatures of dissolution and precipitation of intermetallic compounds in the investigated material were determined in dilatometric tests using a DIL805A/D dilatometer.*

*The scope of the investigation encompassed also the determination of the variations in the magnitude of the yield stress of the tested material, depending on the strain, strain rate and temperature, and the approximation of the obtained experimental test results and the determination of the coefficients of the approximating equation.*

mującego. Celem tego etapu pracy było opracowanie modelu matematycznego zmian własności reologicznych badanego stopu do analiz numerycznych. Badania krzywych plastycznego płynięcia przeprowadzono w próbie skręcania z zastosowaniem plastometru skrętnego STD 812, która umożliwiła ponadto określenie odkształcalności granicznej badanego stopu aluminium.

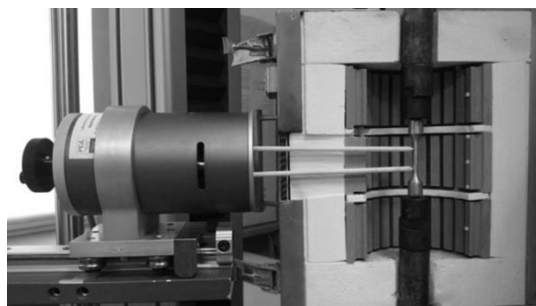
*The aim of this stage of the study was to develop a mathematical model of the variations in the rheological properties of the investigated alloy for numerical analyses. The examination of the plastic flow curves was made in a torsion test performed using an STD 812 torsion plastometer, which enabled also the determination of the limiting deformability of the aluminium alloy under investigation.*

### 3. METODYKA BADAŃ

Badania wysokotemperaturowej plastyczności stopu aluminium AlZn5,5MgCu przeprowadzono w statycznej próbie rozciągania w podwyższonej temperaturze, zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1:2010 [6], przy zastosowaniu maszyny wytrzymałościowej Zwick Z/100 (rys. 1). Do badań zastosowano próbki okrągłe o średnicy  $d = 5 \text{ mm}$  i długości  $l = 28 \text{ mm}$  (rys. 2).

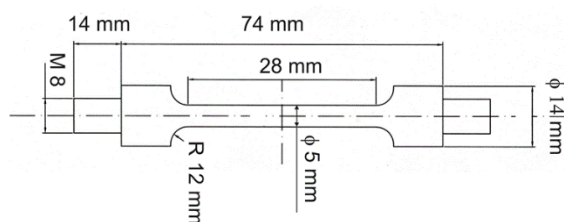
### 3. RESEARCH METHODOLOGY

*The examination of the high-temperature plasticity of aluminium alloy AlZn5.5MgCu was made in a static tensile test at elevated temperature, in accordance with standard PN-EN ISO 6892-1:2010 [6], using a Zwick Z/100 testing machine (Fig. 1). Round specimens with a diameter of  $d = 5 \text{ mm}$  and a length of  $l = 28 \text{ mm}$  (Fig. 2) were used for testing.*



Rys. 1. Komora badawcza maszyny wytrzymałościowej ZWICK Z/100, do prób rozciągania w podwyższonej temperaturze

Fig. 1. The testing chamber of the ZWICK Z/100 testing machine for tensile tests at elevated temperature



Rys. 2. Wymiary próbki do badań w podwyższonej temperaturze

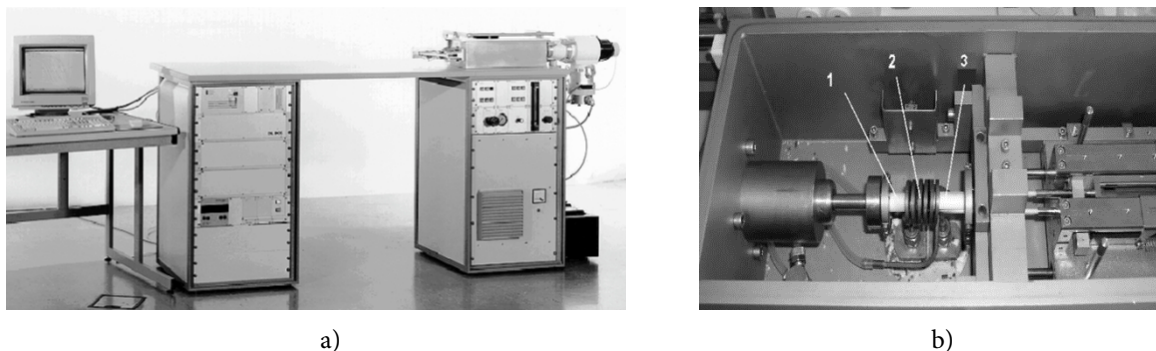
Fig. 2. The dimensions of a specimen for testing at elevated temperature

Próbki do badań nagrzewano do temperatury z zakresu 150–350°C, zmieniając ją co 50°C, wygrzewano w piecu przez 25 minut i następnie poddawano rozciąganiu przy danej temperaturze. Plastyczność oceniano po wyznaczeniu wartości względnego przewężenia  $Z$  i odkształcenia ścinania  $\Lambda_p$ . Następnie wykonano wykresy plastyczności  $Z = f(T)$  i  $\Lambda_p = f(T)$ .

*Test specimens were heated up to a temperature in the range of 150–350°C, while changing it every 50°C, soaked in the furnace for 25 minutes and then subjected to tension at a given temperature. The plasticity was assessed after determining the percentage reduction of area  $Z$  and the shear strain  $\Lambda_p$ . Next, temperature plasticity graphs,  $Z = f(T)$  and  $\Lambda_p = f(T)$ , were plotted.*

W celu wyznaczenia zakresu temperatury rozpuszczania oraz wydzielenia w stopie AlZn5,5MgCu związków międzymetalicznych przeprowadzono badania dylatometryczne, z wykorzystaniem dylatometru DIL805A/D (rys. 3).

To determine the temperature range of the dissolution and precipitation of intermetallic compounds in alloy AlZn5.5MgCu, dilatometric tests were carried out using a DIL805A/D dilatometer (Fig. 3).

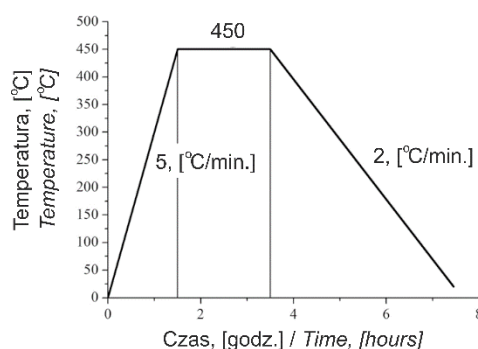


Rys. 3. Dylatometr DIL 805 A/D [7]: a) – stanowisko badawcze; b) – komora do badań dylatometrycznych: 1 – kowadło ruchome, 2 – cewka indukcyjna, 3 – kowadło nieruchome

Fig. 3. The DIL 805 A/D dilatometer [7]: a) testing stand; b) dilatometric testing chamber: 1 – movable anvil, 2 – induction coil, 3 – fixed anvil

Dla obserwacji procesów zachodzących w stopie aluminium AlZn5,5MgCu w stanie wyjściowym (T6) i po wyżarzaniu przeprowadzono 2 cykle obróbki cieplnej. Pierwszy cykl odzwierciedlał przemiany w materiale w stanie wyjściowym (T6), natomiast drugi – w materiale po wyżarzaniu. Uzyskane wyniki przedstawiono w postaci wykresów. Schemat zastosowanej obróbki cieplnej przedstawiono na rys. 4.

For the observation of processes occurring in aluminium alloy AlZn5.5MgCu in its initial state (T6) and after annealing, 2 cycles of heat treatment were carried out. The first cycle reflected transformations in the initial state (T6), while the second cycle – in the material after annealing. The obtained results are presented in the form of diagrams. A schematic diagram of the heat treatment applied is shown in Fig. 4.



Rys. 4. Schemat jednego cyklu wyżarzania stopu AlZn5,5MgCu przeprowadzonego w dylatometrze DIL805A/D  
Fig. 4. A schematic diagram of a single AlZn5.5MgCu alloy annealing cycle carried out in the DIL805A/D dilatometer

Do badań zastosowano standardowe próbki cylindryczne o średnicy  $d = 5$  mm i długości  $l = 10$  mm. W takich próbkach ograniczony jest wpływ bezwładności cieplnej materiału na uzyskiwane wyniki, co ma znaczenie przy dużych szybkościach nagrzewania i chłodzenia. Do określenia zjawisk zachodzących w materiale podczas

Standard cylindrical specimens with a diameter of  $d = 5$  mm and a length of  $l = 10$  mm were used for the tests. In such specimens, the effect of material thermal inertia on the obtained results is limited, which is of significance at high heating and cooling rates. The determination of the phenomena occurring in the material during

obróbki cieplnej wykorzystuje się zjawisko występowania różnic w objętości właściwej poszczególnych faz występujących w badanych materiałach. Podczas nagrzewania lub chłodzenia przemiana fazowa uwidacznia się na krzywej dylatometrycznej w postaci skokowej zmiany długości próbki [8].

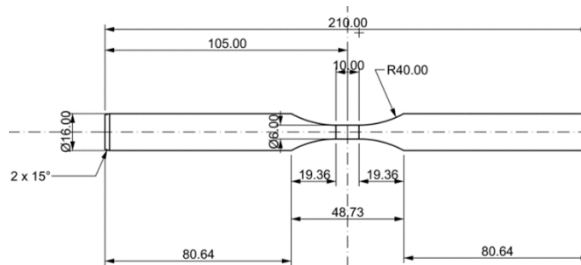
Badania własności reologicznych stopu AlZn5,5MgCu wykonano w próbie skręcania na gorąco, zgodnie z metodyką opisaną w pracach [9, 10]. Do badań zastosowano próbki o wymiarach części roboczej: średnica  $d = 6$  mm i długość  $l = 10$  mm (rys. 5).

Badania przeprowadzono przy temperaturze 150, 200, 250, 300 i 350°C, dla prędkości odkształcenia 0,1, 1,0 i 10,0 s<sup>-1</sup>. Próbki odkształcano do zniszczenia, natomiast aproksymacje wykonano dla odkształcenia rzeczywistego  $\varepsilon = 4$ . Z uwagi na trudności z kontrolowaniem temperatury badanego stopu aluminium z wykorzystaniem termopary, w badaniach wykorzystano również technikę termowizyjną (badania wykonano w powietrzu). Ogólny widok odkształczanych próbek w plastometrze skrętnym STD 812 przedstawiono na rys. 6.

heat treatment utilizes the phenomenon of differences occurring within the specific volume of individual phases present in examined materials. During heating or cooling, phase transition shows on the dilatometric curve in the form of an abrupt change in specimen length [8].

The examinations of the rheological properties of alloy AlZn5.5MgCu were made in a torsion test in accordance with the methodology described in publications [9, 10]. Specimens with the following working part dimensions were used for testing: the diameter,  $d = 6$  mm; and the length,  $l = 10$  mm (Fig. 5).

The tests were conducted at temperature of 150, 200, 250, 300 and 350°C for strain rates of 0.1, 1.0 and 10.0 s<sup>-1</sup>, respectively. The specimens were deformed until a failure, while approximations were made for a true strain of  $\varepsilon = 4$ . Due to difficulties in controlling the temperature of the investigated aluminium alloy using a thermocouple, a thermovision technique was also used in the investigation (the tests were performed in air). A general view of specimens deformed in the STD 812 torsion plastometer is shown in Fig. 6.



Rys. 5. Wymiary próbki do badań w próbie skręcania na gorąco

Fig. 5. The dimensions of a specimen for hot torsion testing



Rys. 6. Próbką podczas badań w komorze plastometru skrętnego

Fig. 6. A specimen during testing in the torsion plastometer chamber

Po przeprowadzeniu badań sporządzono wykresy odkształcenie–naprężenie i określono wpływ parametrów odkształcenia na wartość oraz charakter zmian naprężenia uplastyczniającego badanego stopu, w zależności od prędkości odkształcenia i temperatury.

W celu praktycznego wykorzystania wyników badań plastometrycznych oraz uzyskania matematycznego związku między wartością naprężenia uplastyczniającego  $\sigma_p$  [MPa] i parametrami odkształcenia ( $t$ ,  $\varepsilon$ ,  $\dot{\varepsilon}$ ), wyniki badań eksperymentalnych aproksymowano za pomocą równania Hansela-Spittela [11, 12]:

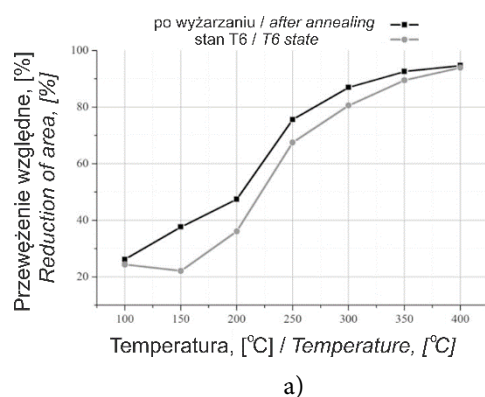
$$\sigma_p = m_1 \cdot \varepsilon^{m_2} \left(\frac{m_3}{\varepsilon}\right) \exp(m_4 \cdot \varepsilon) (1 + \varepsilon)^{m_5 \cdot t} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_6} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_7 \cdot t} \cdot t^{m_8} \exp(m_9 \cdot t) \quad (8)$$

gdzie:  $\varepsilon$  – odkształcenie rzeczywiste,  $\dot{\varepsilon}$  – prędkość odkształcenia,  $s^{-1}$ ,  $t$  – temperatura, °C,  $m_1$ – $m_9$  – współczynniki zależne od gatunku badanego materiału.

Do statystycznej obróbki wyników wykorzystano oprogramowanie Rheology [13].

#### 4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Poniżej przedstawiono wyniki dotyczące wysokotemperaturowej plastyczności badanego stopu aluminium. Na rys. 7 przedstawiono zależność przewężenia względnego i odkształcenia ścinania do zniszczenia próbki w zależności od temperatury badanej próbki.



After completion of the tests, stress–strain diagrams were plotted and then the effect of the deformation parameters on the magnitude and mode of variations in the yield stress of the investigated alloy was determined, as dependant on the strain rate and temperature.

For the practical utilization of the plastic test results and obtaining a mathematical relationship between the magnitude of yield stress  $\sigma_p$  [MPa] and deformation parameters ( $t$ ,  $\varepsilon$ ,  $\dot{\varepsilon}$ ), the experimental test results were approximated with the Hansel-Spittel equation [11, 12]:

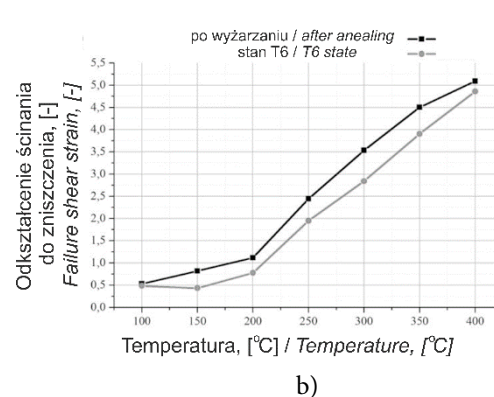
$$\sigma_p = m_1 \cdot \varepsilon^{m_2} \left(\frac{m_3}{\varepsilon}\right) \exp(m_4 \cdot \varepsilon) (1 + \varepsilon)^{m_5 \cdot t} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_6} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_7 \cdot t} \cdot t^{m_8} \exp(m_9 \cdot t) \quad (8)$$

where:  $\varepsilon$  – true strain,  $\dot{\varepsilon}$  – strain rate,  $s^{-1}$ ,  $t$  – temperature, °C,  $m_1$ – $m_9$  – coefficients dependent on the grade of the material tested.

For the statistical processing of the results, the software Rheology [13] was employed.

#### 4. ANALYSIS OF THE INVESTIGATION RESULTS

Results for the high-temperature plasticity of the investigated aluminium alloy are shown below. Fig. 7 illustrates the relationship of the percentage reduction of area and failure shear strain versus test specimen temperature.



Rys. 7. Zależność przewężenia względnego  $Z$  (a) i odkształcenia ścinania do zniszczenia próbki z badanego stopu  $\Lambda_p$  (b) od temperatury, w stanie wyżarzonym oraz w stanie T6

Fig. 7. Dependence on the percentage reduction of area  $Z$  (a) and failure shear strain  $\Lambda_p$  (b) of the investigated alloy specimen on temperature, in an annealed condition and in state T6



Z zależności pokazanych na rys. 7a wynika, że przewężenie względne badanego materiału zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury, przy czym największy przyrost obserwuje się przy temperaturze powyżej 200°C, zarówno dla próbek w stanie T6, jak i po wyżarzaniu. Wartości przewężenia względnego  $Z$  próbek w stanie T6 są mniejsze niż po wyżarzaniu przy temperaturze 400°C, kiedy to wartości te są porównywalne. Krzywe zmiany kryterium plastyczności według Kołmogorowa dla próbek w stanie T6 i po wyżarzaniu są podobne, chociaż wartości dla próbek po wyżarzaniu są większe. Odształcenie ścinania do zniszczenia dla temperatury 200°C nieznacznie się zwiększa (rys. 7b), natomiast przy wyższej temperaturze obserwuje się istotny wzrost wartości parametru  $\Lambda_p$ . Z danych przedstawionych na wykresie (rys. 7b) można wnioskować, iż wzrost plastyczności stopu AlZn5,5MgCu zaczyna się przy temperaturze z zakresu 200–250°C.

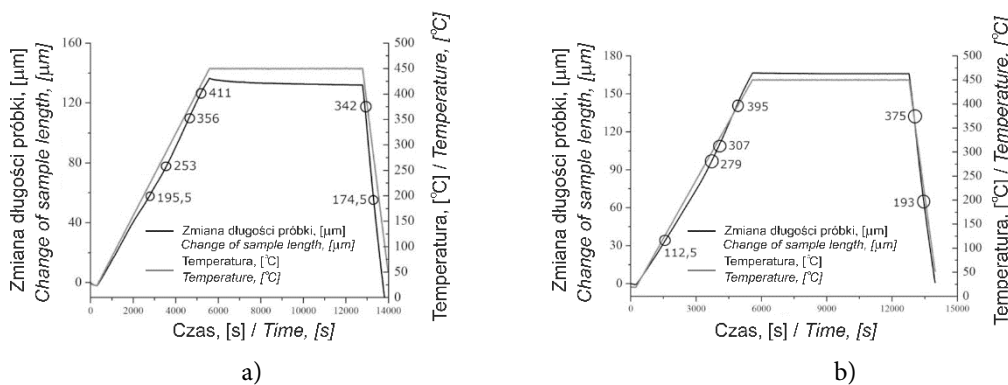
Ze względu na to, że istotny wpływ na dokładność przeprowadzonych analiz oraz otrzymanych wyników badań mają procesy zachodzące w materiale podczas procesu nagrzewania, wygrzewania i chłodzenia, w pracy przeprowadzono również badania dylatometryczne analizowanego stopu, na podstawie których wyznaczono zakres temperatury rozpuszczania oraz wydzielania się w nim związków międzymetalicznych.

Badania dylatometryczne wykonano dla czterech próbek. Uzyskana temperatura (cztery wartości temperatury dla zmian długości próbek z badanego stopu tak w pierwszym, jak i w drugim cyklu wyżarzania przy nagrzewaniu i dwie – przy chłodzeniu) zaznaczono na rys. 8 oraz w tab. 1.

The relationships depicted in Fig. 7a show that the percentage reduction of the material under investigation increases with increasing temperature, with the greatest increment being observed at temperatures above both for specimens in state T6 and after annealing. The values of the percentage reduction in area,  $Z$ , of specimens in state T6 are smaller compared to specimens after annealing at 400°C, at which point these values are comparable. The curves of Kolmogorov's yield criterion for specimens in state T6 and as-annealed are similar, though the values for annealed specimens are greater. The failure shear strain for a temperature of 200°C slightly increases (Fig. 7b), while at higher temperatures, a significant increase in  $\Lambda_p$  parameter value is observed. It can be noticed from the data in the diagram (Fig. 7b) that the increase in the plasticity of alloy AlZn5.5MgCu starts at temperatures in the range of 200–250°C.

In view of the fact that the accuracy of the analyses and the obtained investigation results is significantly affected by processes occurring in the material during the course of the heating, soaking and cooling processes, dilatometric tests of the investigated alloy were also carried out within the study, on the basis of which the temperature ranges for the dissolution and precipitation of intermetallic compounds in the alloy were determined.

The dilatometric tests were performed for four specimens. The obtained temperatures (four temperatures for the length variations of specimens of the investigated alloy, both in the first and the second annealing cycle, in heating, and two – in cooling) are indicated in Fig. 8 and in Tab. 1.



Rys. 8. Zmiany długości próbek w procesie wyżarzania: a) – pierwszy cykl; b) – drugi cykl  
Fig. 8. Specimen length variation in the annealing process: a) – first cycle; b) – second cycle

Tab. 1. Temperatura charakterystyczna przy nagrzewaniu i chłodzeniu stopu AlZn5,5MgCu  
 Tab. 1. Characteristic temperatures in heating and cooling of alloy AlZn5.5MgCu

1 cykl (stan T6) / Cycle 1) state T6		2 cykl (po wyżarzaniu) / Cycle 2 (after annealing)	
Podczas nagrzewania, °C During heating, °C	Podczas chłodzenia, °C During cooling, °C	Podczas nagrzewania, °C During heating, °C	Podczas chłodzenia, °C During cooling, °C
195,5	342	112,5	375
253		279	
356	174,5	307	193
411		395	

Z danych przedstawionych na rys. 8 oraz w tab. 1 wynika, że po wyżarzaniu rozpuszczanie związków międzymetalicznych w procesie nagrzewania rozpoczyna się przy niższej temperaturze niż w stopie dostarczonym w stanie T6, chociaż procesy te są mniej intensywne, o czym świadczy mniejsze przegięcie krzywej (rys. 8). Wydzielanie się związków międzymetalicznych podczas chłodzenia w stopie wyżarzonym zaczyna się przy wyższej temperaturze, w porównaniu ze stopem w stanie T6. Procesy rozpuszczania i wydzielania związków międzymetalicznych przy odpowiedniej temperaturze mają wpływ na plastyczność materiału.

Na podstawie analizy danych przedstawionych w tab. 1 stwierdzono, że podczas nagrzewania stopu w stanie T6, w zakresie temperatury 196–253°C, w strukturze przebiegał proces rozpuszczania się związków międzymetalicznych. Jak wynika z przeprowadzonych badań (rys. 7), ma to istotny wpływ na plastyczność materiału powyżej 200°C. W przypadku stopu w stanie wyżarzonym zakres temperatury rozpuszczania się związków międzymetalicznych był większy i wynosił 113–279°C.

Wyniki badań własności reologicznych stopu aluminium AlZn5,5MgCu przedstawiono na rys. 9. Na podstawie otrzymanych wyników badań własności reologicznych stwierdzono, że istnieje duży wpływ parametrów temperaturowo-odkształceniowych na wartość naprężenia uplastyczniającego badanego stopu aluminium. Analizując wpływ temperatury próbki na wartość naprężenia uplastyczniającego, zaobserwowano, że dla tych samych prędkości odkształcania naprężenie uplastyczniające badanego stopu osiąga największe wartości przy temperaturze 150°C i wraz ze wzrostem temperatury próbki wartość

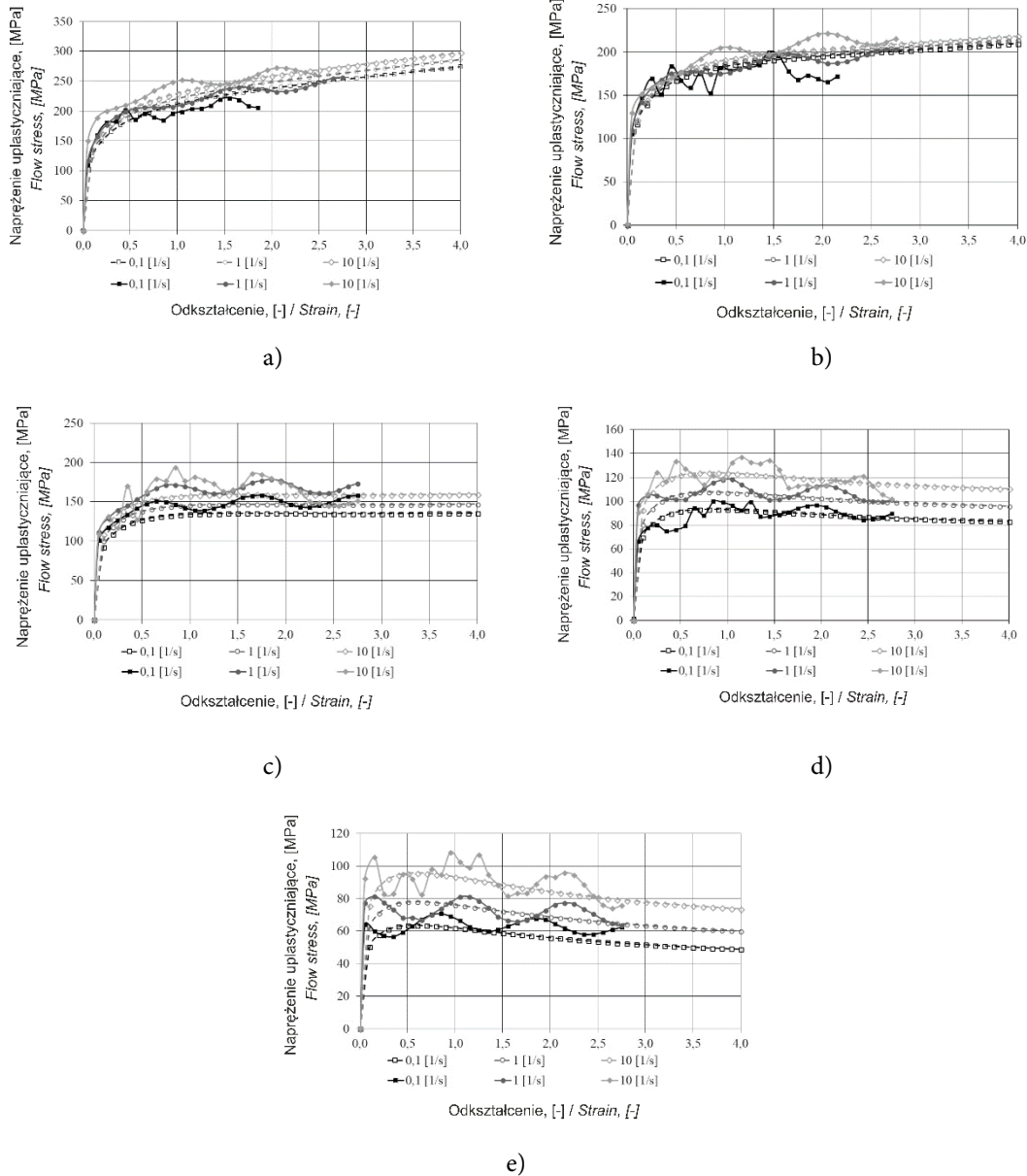
*The data in Fig. 8 and in Tab. 1 show that, after annealing, the dissolution of intermetallic compounds in the heating process commences at lower temperature, as compared to the alloy delivered in state T6, though these processes are less intensive, as indicated by the smaller inflection of the curve (Fig. 8). The precipitation of intermetallic compounds in the annealed alloy during cooling starts at higher temperatures, compared to the alloy in state T6. The processes of intermetallic compound dissolution and precipitation at specific temperatures influence the ductility of the material.*

*The analysis of the data in Tab. 1 found that during heating of the alloy in state T6, the process of intermetallic compound dissolution took place in the structure in the temperature range of 196–253°C. As shown by the tests (Fig. 7), this has a significant influence on the ductility of material above 200°C. In the case of the alloy in as-annealed state, the temperature range for intermetallic compound dissolution was larger, amounting to 113–279°C.*

*The results of the tests for the rheological properties of aluminium alloy AlZn5.5MgCu are illustrated in Fig. 9. From the obtained rheological test results it has been found that there is a strong effect of the temperature-strain parameters on the magnitude of the yield stress of the aluminium alloy under study. When analyzing the effect of specimen temperature on the magnitude of yield stress it was observed that, for the same strain rates, the yield stress of the examined alloy attained the greatest values at a temperature of 150°C, and with the increase in specimen temperature, the yield stress value for identical*

naprężenia uplastyczniającego dla tych samych prędkości odkształcania maleje. Dla odpowiednich prędkości odkształcania najmniejsze wartości naprężenia uplastyczniającego badanego stopu wystąpiły przy temperaturze 350°C.

strain rates decreased. For specific strain rates, the smallest values of the yield stress of the examined alloy occurred at a temperature of 350°C.



Rys. 9. Krzywe umocnienia stopu aluminium AlZn5,5MgCu przy temperaturze: a) 150°C, b) 200°C, c) 250°C, d) 300°C, e) 350°C; linie ciągłe (dane doświadczalne), linie przerywane (krzywe uzyskane w wyniku aproksymacji)

Fig. 9. Work-hardening curves for aluminium alloy AlZn5.5MgCu at temperature: a) 150°C, b) 200°C, c) 250°C, d) 300°C, e) 350°C, solid lines (experimental data), broken lines (curves obtained from approximation)

Analizując przebieg rzeczywistych krzywych umocnienia badanego stopu, można zaobserwować wyraźne oscylacje w całym badanym zakresie parametrów odkształcania. Jak wynika z literatury technicznej [9, 10], w przypadku próby skręcania na gorąco zastosowanie próbek o śred-

When examining the shape of the real work-hardening curves for the investigated alloy, distinct oscillations can be observed within the entire range of deformation parameters. As shown by the technical literature [9, 10], in the case of the hot torsion test, using specimens of a diameter

nicy poniżej 6 mm, niekiedy może powodować niestabilność wyników. W pracy, z uwagi na możliwości badawcze plastometru skrętnego STD 812 oraz wymaganą maksymalną prędkość odkształcenia, zastosowano próbki o średnicy 6 mm. Zastosowane wymiary próbek są zgodne z ogólnie przyjętymi zasadami podczas badań plastometrycznych w próbie skręcania [9, 10]. Na podstawie dotychczasowych badań własnych autorów stwierdzono, że niestateczne przebiegi naprężenia badanego stopu mogą być spowodowane charakterystyką samego materiału i mogą być one wywołane zmianami zachodzącymi w strukturze badanego stopu aluminium.

Stwierdzono, że charakter krzywych plastycznego płynięcia stopu AlZn5,5MgCu jest podobny dla całego zakresu prowadzonych badań. Z analizy danych przedstawionych na rys. 9 wynika, że wraz ze wzrostem odkształcenia wartość naprężenia uplastyczniającego badanego stopu aluminium zwiększa się monotonicznie dla temperatury 150 i 200°C i przyjmuje stałą wartość dla temperatury 250°C. Dla temperatury 300 i 350°C, przy wartościach odkształcenia do 0,5, wartość naprężenia uplastyczniającego wzrasta, natomiast przy większych odkształceniach – monotonicznie maleje.

Ze wzrostem prędkości odkształcenia następuje równoczesny wzrost wartości naprężenia uplastyczniającego, natomiast na skutek wzrostu temperatury badanego stopu obserwuje się spadek tego naprężenia.

Z analizy przebiegu rzeczywistych i aproksymowanych krzywych umocnienia badanego stopu aluminium wynika, że w badanym zakresie parametrów odkształcenia uzyskano dużą zgodność pomiędzy rzeczywistymi wartościami naprężenia uplastyczniającego a wartościami aproksymowanymi.

Współczynniki równania aproksymującego wyniki badań doświadczalnych (8) przedstawiono w tab. 2.

*below 6 mm can result in an instability of results in some instances. Considering the testing capabilities of the STD 812 torsion plastometer and the required maximum strain rate, specimens of a diameter of 6 mm were used in the study. The employed specimen sizes comply with the generally adopted principles to be used during plastometric testing in a torsion test [9, 10]. The authors' previous studies have found that unstable variations in the stress of the investigated alloy may be due to the characteristic of the material itself and can be caused by changes occurring in the structure of the aluminium alloy under study.*

*The behaviour of the plastic flow curves for alloy AlZn5.5MgCu has been found to be similar in the entire investigation scope. The analysis of the data in Fig. 9 shows that with the increase in deformation, the value of the yield stress of the investigated aluminium alloy increases monotonically for temperatures of 150 and 200°C and assumes a constant value for a temperature of 250°C. For temperatures of 300 and 350°C, at deformation values of up to 0.5, the yield stress value increases, while at higher deformations – it decreases monotonically.*

*With the increase in strain rate, a simultaneous increase in yield stress value takes place; whereas, as a result of the increase in alloy temperature, a drop in yield stress is observed.*

*The analysis of the behaviour of the real and approximated work-hardening curves for the examined aluminium alloy shows that good agreement between the real yield stress values and the approximated values has been obtained in the examined range of deformation parameters.*

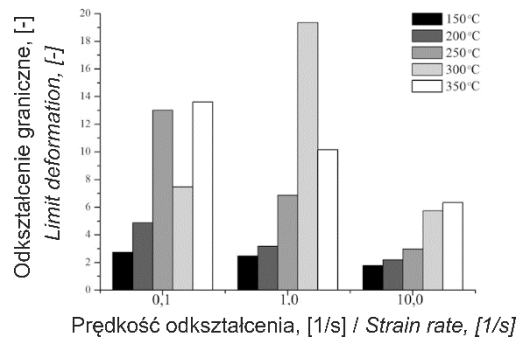
*The coefficients of the equation approximating the experimental test results (8) are given in Tab. 2.*

Tab. 2. Parametry funkcji (8) aproksymującej wyniki badań plastometrycznych stopu aluminium AlZn5,5MgCu  
Tab. 2. The parameters of the function (8) approximating the results of AlZn5.5MgCu aluminium alloy plastometric tests

$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$	$m_6$	$m_7$	$m_8$	$m_9$	Średni błąd Mean error
1,36610	0,31149	0,00018	0,06608	-0,00270	-0,09845	0,00054	1,32965	-0,00908	0,80430

Na rys. 10 przedstawiono zmianę odkształcenia granicznego stopu AlZn5,5MgCu w zależności od temperatury i prędkości odkształcenia.

Fig. 10 illustrates the variation in the limiting deformation of the AlZn5.5MgCu alloy as a function of temperature and strain rate.



Rys. 10. Zależność odkształcenia granicznego stopu aluminium AlZn5,5MgCu od zmian temperatury i prędkości odkształcenia

Fig. 10. Dependence of the limiting deformation of the AlZn5,5MgCu aluminium alloy on the variations in temperature and strain rate

Z danych przedstawionych na rys. 10 wynika, że poza przypadkiem odkształcania próbek przy temperaturze 300°C, wraz ze zwiększeniem prędkości odkształcenia przy tej samej temperaturze, wartości odkształcenia granicznego maleją. Największa wartość odkształcenia granicznego występuje przy temperaturze 250 i 300°C i prędkości odkształcenia 0,1 s<sup>-1</sup>. Natomiast przy temperaturze 300°C maksymalne graniczne odkształcenie (~20) występuje przy prędkości odkształcenia 1 s<sup>-1</sup>. Z wyników badań dylatometrycznych wynika, że akurat przy temperaturze wyższej od 279°C w tym stanie strukturalnym obserwuje się zmianę przebiegu krzywej odzwierciedlającą różnice w długości próbki, co świadczy o przebiegu rozpuszczania się w badanym stopie związków międzymetalicznych (tab. 1).

The data in Fig. 10 shows that, except for the case of deforming specimens at a temperature of 300°C, with the increase in strain rate at the same temperature, the limiting deformation values decrease. The highest limiting deformation value occurs at temperature of 250 and 300°C and a strain rate of 0.1 s<sup>-1</sup>. By contrast, at a temperature of 300°C, the maximum limiting deformation (~20) occurs at a strain rate of 1 s<sup>-1</sup>. The plastometric test results show that, just at a temperature higher than 279°C in this structural state, a change in the behaviour of the curve is observed, which reflects the differences on specimen length, indicating the process of dissolution of intermetallic compounds in the investigated alloy (Tab. 1).

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Po przeprowadzeniu badań plastyczności, badań dylatometrycznych oraz badań własności reologicznych stopu aluminium AlZn5,5MgCu oraz po analizie otrzymanych wyników stwierdzono, że:

- największy przyrost przewężenia badanego stopu (a tym samym jego plastyczności) wystąpił powyżej 200°C, co było spowodowane rozpuszczaniem się w badanym materiale związków międzymetalicznych;

## 5. SUMMARY AND CONCLUSIONS

After the completion of the plasticity and dilatometric tests and the examination of the rheological properties of the AlZn5,5MgCu aluminium alloy and upon the analysis of the obtained results, it has been found that:

- the greatest increment in the percentage reduction in area of the investigated alloy (and thus its plasticity) occurred above 200°C, which was caused by the dissolution of intermetallic compounds in the alloy;

- przebieg krzywych obrazujących zmiany kryterium plastyczności stopu AlZn5,5MgCu według Kołmogorowa dla próbek w stanie T6 i po wyżarzaniu jest podobny, natomiast wartości tego kryterium dla próbek wyżarzonych są wyższe;
- największa wartość odkształcenia granicznego badanego stopu występuje przy temperaturze 250 i 300°C i prędkości odkształcenia 0,1 s<sup>-1</sup>, natomiast przy temperaturze 300°C maksymalne graniczne odkształcenie występuje przy prędkości odkształcenia 1 s<sup>-1</sup>;
- podczas nagrzewania rozpuszczanie związków międzymetalicznych badanego stopu będącego w stanie wyżarzonym rozpoczyna się przy niższej temperaturze niż w stopie dostarczonym w stanie T6, chociaż procesy te są mniej intensywne;
- podczas chłodzenia wydzielanie się związków międzymetalicznych w stopie AlZn5,5MgCu po wyżarzaniu rozpoczyna się przy wyższej temperaturze niż w stopie będącym w stanie T6.

Na podstawie analizy otrzymanych wyników badań stwierdzono, że właściwą temperaturą przeróbki plastycznej badanego stopu jest temperatura powyżej 200°C.

## PODZIĘKOWANIA

Badania zrealizowano w ramach badań własnych i badań statutowych Politechniki Częstochowskiej nr BS/PB-201-301/2013.

## LITERATURA

- [1] Dyja H., A. Gałkin, M. Knapiński. 2010. *Reologia metali odkształczanych plastycznie*. Częstochowa: Wyd. Politechniki Częstochowskiej.
- [2] Kolmogorov V.L. 1970. *Napriazhenija. Dieformacija. Plastichnost, Mietalurgija*. Moskwa.
- [3] Kolmogorov V.L. 1977. *Plastichnost i razrushenie, Metallurgija*. Moskwa.
- [4] Bogatov A.A., O.I. Mizhrickij, S.V. Smirnov. 1984. *Resurs plastichnosti metallov pri obrabotke davleniem, Metallurgija*. Moskwa.
- [5] Moczalov N.A., A.M.Galkin, S.N. Moczalov, D.Ju. Parfienov. 2003. *Plastometricheskije issledovanija mietallov*. Moskwa: Wyd. Intermet Inżyniring.

- *the shape of the curves depicting the variations in Kolmogorov's yield criterion of alloy AlZn5.5MgCu for specimens in state T6 and after annealing is similar, while the yield criterion values for annealed specimens are higher;*
- *the greatest magnitude of the limiting deformation of the investigated alloy occurs at temperature of 250 and 300°C and at a strain rate of 0.1 s<sup>-1</sup>, while at a temperature of 300°C, the maximum limiting deformation occurs at a strain rate of 1 s<sup>-1</sup>;*
- *during heating, the dissolution of intermetallic compounds in the investigated alloy in an annealed state starts at lower temperature than in the alloy delivered in state T6, though these processes are less intensive,*
- *during cooling, the precipitation of intermetallic compounds in alloy AlZn5.5MgCu after annealing starts at higher temperatures than in the alloy in state T6.*

*The analysis of the investigation results has found that the proper temperature of plastic working of the alloy under study is a temperature above 200°C.*

## ACKNOWLEDGEMENTS

*Research conducted as a part of Czestochowa University of Technology Work Program and statutory work no. BS/PB-201-301/2013.*

## REFERENCES

- [1] Dyja H., A. Gałkin, M. Knapiński. 2010. *Reologia metali odkształczanych plastycznie*. Częstochowa: Wyd. Politechniki Częstochowskiej.
- [2] Kolmogorov V.L. 1970. *Napriazhenija. Dieformacija. Plastichnost, Mietalurgija*. Moscow.
- [3] Kolmogorov V.L. 1977. *Plastichnost i razrushenie, Metallurgija*. Moscow.
- [4] Bogatov A.A., O.I. Mizhrickij, S.V. Smirnov. 1984. *Resurs plastichnosti metallov pri obrabotke davleniem, Metallurgija*. Moscow.
- [5] Moczalov N.A., A.M.Galkin, S.N. Moczalov, D.Ju. Parfienov. 2003. *Plastometricheskije issledovanija mietallov*. Moscow: Wyd. Intermet Inżyniring.

- [6] PN-EN ISO 6892-1:2009: *Metale - Próba rozciągania - Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej*. Polski Komitet Normalizacyjny, 2009.
- [7] *Manual WinTa 6.2 – Software*, Bahr-Thermoanalyse GmbH, Germany 1998.
- [8] Koczurkiewicz B. 2016. *Podstawy technologii wytwarzania blach grubych ze stali niskowęglowych z mikrodotatkami przeznaczonych na rury przewodowe*, Częstochowa: Wyd. Politechniki Częstochowskiej.
- [9] Hadasik E. 2002. „Metodyka wyznaczania charakterystyk plastyczności w próbie skręcania na gorąco”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej* 63: 6–124.
- [10] Hadasik E. 2008. *Badania plastyczności metali*, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [11] Henzel A., T. Spittel. 1982. *Raschet energosilovoykh parametrov v processakh obrabotki metallov davlenijem*. Metallurgija. Moskwa.
- [12] Kawalek A.M., H.S. Dyja, M.J. Knapinski. 2009. “The analysis of the process of asymmetric rolling of plates”. W *THERMEC 2009 – 6th International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials, Berlin, Germany, August 25–29, 2009*, 2585–2590. Materials Science Forum 638-642, part: 1-4/2010.
- [13] Danchenko V., H. Dyja, L. Lesik, L. Mashkin, A. Milenin. 2002. *Technologia i modelowanie procesów walcowania w wykrojach*. Politechnika Częstochowska, Prace Dydaktyczne Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Seria: Metalurgia Nr 28. Częstochowa: Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej Politechniki Częstochowskiej.
- [6] PN-EN ISO 6892-1:2009: *Metale - Próba rozciągania - Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej*. Polski Komitet Normalizacyjny, 2009.
- [7] *Manual WinTa 6.2 – Software*, Bahr-Thermoanalyse GmbH, Germany 1998.
- [8] Koczurkiewicz B. 2016. *Podstawy technologii wytwarzania blach grubych ze stali niskowęglowych z mikrodotatkami przeznaczonych na rury przewodowe*, Częstochowa: Wyd. Politechniki Częstochowskiej.
- [9] Hadasik E. 2002. „Metodyka wyznaczania charakterystyk plastyczności w próbie skręcania na gorąco”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej* 63: 6–124.
- [10] Hadasik E. 2008. *Badania plastyczności metali*, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [11] Henzel A., T. Spittel. 1982. *Raschet energosilovoykh parametrov v processakh obrabotki metallov davlenijem*. Metallurgija. Moskwa.
- [12] Kawalek A.M., H.S. Dyja, M.J. Knapinski. 2009. “The analysis of the process of asymmetric rolling of plates”. W *THERMEC 2009 – 6th International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials, Berlin, Germany, August 25–29, 2009*, 2585–2590. Materials Science Forum 638-642, part: 1-4/2010.
- [13] Danchenko V., H. Dyja, L. Lesik, L. Mashkin, A. Milenin. 2002. *Technologia i modelowanie procesów walcowania w wykrojach*. Politechnika Częstochowska, Prace Dydaktyczne Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Seria: Metalurgia Nr 28. Częstochowa: Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej Politechniki Częstochowskiej.

